

Cruz, N.; Mateus, C.; Cruz, J.; Rios, S.; Ramos, C.; Rodrigues, C.; Fortunato, E. (2016). Solos tratados com Geopolímeros. Uma experiência com macro-provetes constituídos sob condições controladas. 8º Congresso Rodoviário Português, Portugal

SOLOS TRATADOS COM GEOPOLÍMEROS. UMA EXPERIÊNCIA COM MACRO-PROVETES CONSTITUÍDOS SOB CONDIÇÕES CONTROLADAS

Nuno Cruz¹, Carin Mateus¹, Jorge Cruz², Carlos Rodrigues³, Sara Rios⁴, Catarina Ramos⁴, Eduardo Fortunato⁵

¹ Mota-Engil – Engenharia e Construção, S.A., Direção de Coordenação Técnica Rodoviária, Rua do Rego Lameiro, 38, 4300-454 Porto, Portugal, nunocruz@mota-engil.pt; carin.mateus@mota-engil.pt

² Mota-Engil – Engenharia e Construção, S.A., Direção de Fundações e Geotecnia, Rua do Rego Lameiro, 38, 4300-454 Porto, Portugal

³ Instituto Politécnico da Guarda, Av. Dr. Francisco Sá Carneiro, 50, 6300-559 Guarda, Portugal

⁴ CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, R. Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

⁵ Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Dep. de Transportes, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Sumário

O desenvolvimento de programas experimentais orientados para a aplicação de novos produtos ou processos na indústria da construção centra-se habitualmente em duas fases distintas, nomeadamente a realização de ensaios laboratoriais sobre provetes de pequenas dimensões, seguidos de uma fase experimental enquadrada com a escala da obra, tanto em dimensão como nos métodos de monitorização. Nesta comunicação apresenta-se uma experiência realizada no âmbito de um projeto sobre tratamento de solos com geopolímeros para vias de baixo custo, ilustrativa da mais-valia que a modelação física em condições controladas pode constituir na transição entre programas laboratoriais e a aplicação industrial de soluções inovadoras.

Palavras-chave: Tratamento de solos; Geopolímeros; Macro-provetes; Infraestruturas de transportes.

1 INTRODUÇÃO

No presente artigo descreve-se sumariamente uma experiência realizada no âmbito do projeto ECOSOLO, que decorreu ao abrigo de um programa do QREN, cujo objetivo se centrou no estudo de uma nova solução para tratamento de solos de estradas de baixo custo (*low-cost roads*), incorporando resíduos inertes da queima de carvão. Este tipo de estradas tem particular relevância em África e na América Latina, regiões onde atualmente laboram várias empresas portuguesas e onde a empresa promotora (MOTA-ENGIL) tem obras e interesses estratégicos de internacionalização, em especial no que se refere a infraestruturas de transporte, nomeadamente estradas e linhas férreas. O tratamento consiste na ativação alcalina de cinzas volantes previamente misturadas com o solo, de cujas reações químicas resulta um gel cimentício que une as partículas de solo de modo semelhante a um tratamento com cimento Portland convencional, mas com menor produção de dióxido de carbono. Esta solução tem sido estudada noutras áreas de aplicação (p. ex. no betão), mas ainda não tinha sido aplicada no tratamento de solos, nomeadamente no caso da estabilização de solos para plataformas de infraestruturas de transporte, onde é frequente a utilização de misturas de solo com cimento Portland e/ou cal aérea [1]. A existência de uma solução mais económica e ambientalmente sustentável poderá traduzir-se em importantes benefícios, em particular devido aos significativos volumes de materiais envolvidos neste tipo de obras.

Com este enquadramento, a MOTA-ENGIL em conjunto com a Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP) e o Instituto Politécnico da Guarda (IPG), promoveram a realização de um projeto para avaliar os principais benefícios mecânico-estruturais desta nova solução, o seu desempenho ao longo do ciclo de vida das infraestruturas, o seu enquadramento ambiental e os principais problemas na sua aplicação à escala industrial. Para além dos copromotores do projeto participaram ainda em regime de subcontratação o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), a Unidade de Microscopia da Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

(UTAD) e a Universidade Militar Nueva Granada da Colômbia (UMNG), esta última disponibilizando um sistema de realização de ensaios de fadiga em macro-escala.

Tendo em atenção estes objetivos, o programa experimental foi primeiramente desenvolvido em ambiente laboratorial e depois alargado a uma macro-escala, para refletir de forma mais próxima os problemas de execução industrial. Assim, utilizou-se uma câmara de calibração desenvolvida pela MOTA-ENGIL num projeto anterior (RESOIL, 2011) e um equipamento da UMNG. Para o efeito foi previamente selecionado um solo utilizado com frequência na cidade de Bogotá (Colômbia), que apesar de ter características geotécnicas razoáveis, ainda assim são insuficientes para cumprir com os requisitos de utilização vigentes na Colômbia. Por seu lado, estes solos apresentam características físicas muito similares aos dos solos graníticos da cidade do Porto, o que permitiu a utilização destes nos ensaios realizados na câmara de calibração em Portugal. O solo colombiano foi previamente caracterizado e de seguida foram realizados ensaios de compressão simples sobre provetes de misturas com diferentes percentagens de cinza e distintas concentrações de ativadores alcalinos, para seleção das duas formulações mais equilibradas em termos de custo/benefício. Sobre estas misturas incidiu um estudo aprofundado no domínio macroestrutural, mecânico e químico, recorrendo a vários equipamentos disponibilizados pelas diversas instituições intervenientes. O completo plano experimental permitiu a avaliação da influência que os principais fatores têm no comportamento do solo tratado. Foi possível observar a macroestrutura das misturas, avaliar os ganhos de rigidez obtidos com o tratamento, estimar o seu desempenho mecânico em condições ambientais idênticas às observadas em Bogotá (recorrendo a uma câmara fito-climática), conhecer a evolução da permeabilidade e antecipar a sua erodibilidade.

No entanto, a caracterização laboratorial de provetes de dimensão reduzida não é suficiente para abranger as principais questões relacionadas com as condições de execução à escala da obra, que, como se sabe, têm uma influência preponderante no impacto económico associado e, por consequência, na aplicabilidade da solução. Em particular, no contexto deste estudo procurava-se avaliar as dificuldades da execução e compactação da mistura em volumes mais significativos do que aqueles associados a provetes laboratoriais de dimensão reduzida, o grau de homogeneidade passível de ser obtido, a evolução do comportamento ao longo do tempo em condições ambientais variáveis, a resistência à fadiga, e a adequabilidade dos ensaios in situ habitualmente utilizados no controlo de qualidade de obras rodoviárias e ferroviárias. Neste contexto, a realização de macro-provetes instalados em câmaras de calibração, como a da MOTA-ENGIL, ou no trecho experimental para realização dos ensaios de fadiga na UMNG, permitiu a análise desses fatores em condições controladas de execução e de cura, idênticas às implementadas em laboratório, constituindo-se como uma fundamental ponte de ligação entre os estudos laboratoriais realizados sobre provetes de dimensão reduzida e a aplicação industrial. De modo sumário, o esqueleto fundamental do projeto pode ser descrito do seguinte modo:

- a) Seleção e caracterização do solo colombiano para a experimentação laboratorial e de um solo equivalente para a experiência na câmara de calibração realizada em Portugal (MOTA-ENGIL);
- b) Estudos laboratoriais de formulação para seleção das misturas a estudar com nível de detalhe superior (Laboratórios da FEUP e MOTA-ENGIL);
- c) Caracterização laboratorial da evolução ao longo do tempo das propriedades mecânicas das misturas selecionadas e análise da influência das condições de cura nos comportamentos mecânico e hidráulico (resistência, permeabilidade e erodibilidade) dessas misturas (FEUP e IPG);
- d) Caracterização microestrutural (Microscopia Eletrónica da UTAD), caracterização química e caracterização mecânica em condições de cura controladas em câmara fito-climática (IPG) das misturas;
- e) Avaliação da mistura tratada com recurso a ensaios in situ realizados em macro-provetes: câmara de calibração da MOTA-ENGIL e sistema in situ de ensaio de resistência à fadiga da UMNG.

Na presente comunicação apresenta-se fundamentalmente a experiência realizada na câmara de calibração da MOTA-ENGIL, refletindo sobre as características deste tipo de tratamento e ilustrando ao mesmo tempo a vantagem de utilização deste tipo de infraestrutura. São apresentados resultados do controlo de qualidade obtidos durante a construção do macro-provete e resultados de caracterização do módulo de deformabilidade das camadas, obtidos em diversas situações. Numa outra comunicação, igualmente submetida a esta conferência, apresentam-se outros resultados deste projeto.

2 METODOLOGIA

A câmara de calibração (Figura 1), desenvolvida pela MOTA-ENGIL no âmbito do projeto RESOIL (2011), é constituída por um contentor adaptado que dispõe de duas células, cada uma com $2,0 \times 2,0 \times 2,0 \text{ m}^3$, divididas por um separador central amovível de modo a poderem funcionar em separado ou em conjunto. Para além disso, dispõe ainda de um pequeno compartimento que comunica com as células e que permite a instalação e utilização de equipamento de monitorização e controlo dos ensaios, de forma protegida. Neste caso, foi usado o bloco inteiro de $4 \times 2 \times 1,1 \text{ m}^3$.

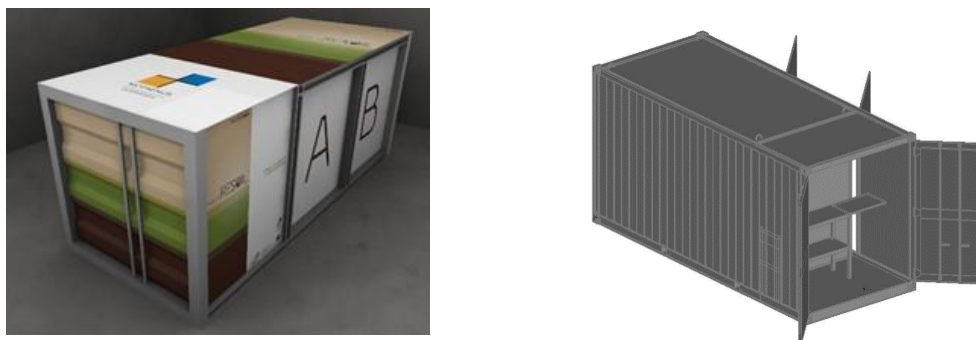


Fig.1. Câmara de calibração da MOTA-ENGIL

O objetivo da experiência foi construir e ensaiar um maciço de grande volume de uma mistura de solo com cinzas (20%) ativadas por uma solução alcalina. Com estes ensaios pretendeu-se comparar a rigidez da mistura com a do solo não tratado e avaliar a evolução dessa rigidez ao longo do período de cura, estendendo as conclusões do programa laboratorial sobre provetes de pequenas dimensões a uma macro-escala. Os materiais utilizados foram previamente sujeitos a caracterização laboratorial, considerando os ensaios de referência habitualmente utilizados no acompanhamento geotécnico de obras de aterro.

Para efeitos de construção do macro-provete foi adotada uma base constituída por solo não tratado, com teor em água natural próximo do ótimo do Proctor Leve, disposto em 3 camadas com espessuras da ordem de 0,30 m, construídas em 3 dias consecutivos, em condições de tempo seco. Durante a construção verificou-se que a camada inferior de solo não tratado ficou apenas com 0,25 m de espessura, pelo que se compensou na segunda camada, passando esta a ter 0,35 m. Na terceira camada, que serviu de fundação à camada tratada, foi obtida a espessura prevista de 0,30 m. Dado que a compactação na câmara teria de ser efetuada com recurso a placa vibratória, optou-se por realizar os ensaios Proctor com energia leve e pesada, servindo o primeiro de referência para a execução do trabalho. Além disso, tratando-se de um projeto destinado a estradas de baixo custo (*low-cost roads*) onde a preocupação com as camadas subjacentes é, em geral, baixa, optou-se por atingir graus de compactação não muito elevados. Nos Quadros 1 e 2 apresentam-se as características do solo utilizado.

Quadro 1. Ensaios de identificação do solo natural

Teor em água (%)	< #200 (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)	Classificação Unificada	Classificação AASHTO
15,7	30,2	NP	NP	SM	A-2-4(0)

Quadro 2. Ensaios de compactação do solo natural

Proctor Leve		Proctor Pesado		CBR a 95%	Expansão a 95%
γ_{dmax}^* (kN/m ³)	w_{opt}^{**} (%)	γ_{dmax}^* (kN/m ³)	w_{opt}^{**} (%)	(%)	(%)
17,58	15,2	18,96	12,0	15	1

* γ_{dmax} – peso volúmico seco máximo; ** w_{opt} – teor em humidade ótimo

Sobre esta base de solos foi executada uma camada com 0,20 m de espessura de mistura de solo com 20% de cinzas ativada por uma solução alcalina constituída por silicato de sódio e hidróxido de sódio. No que diz respeito ao tratamento, este envolve a reação química de óxidos alumino-silicatados com polisilicatos alcalinos sustentados por ligações Si-O-Al [2], as quais podem ser obtidas através da utilização de materiais naturais (caulinite, micas, andaluzite entre outros) ou de produtos secundários como as cinzas de queima de carvão, as escórias, sílica ativa ou casca de arroz. A solução alcalina utilizada é normalmente baseada em sódio ou em potássio [3]. No caso presente, a mistura incorporou 20% de cinzas com baixo teor em cálcio, classificadas como F de acordo com a norma ASTM C 618 [4], fornecidas pela Central Termoelétrica do Pego. No Quadro 3 apresenta-se a sua constituição química.

Quadro 3. Características das cinzas usadas na mistura

Elemento	Si	Al	Fe	Ca	K	Ti	Mg	Na	S	Outros
Cinza	54.84	19.46	10.73	4.68	4.26	1.40	1.79	1.65	0.7	0.5

Com recurso a uma betoneira começou por se homogeneizar o solo e as cinzas a que se seguiu a mistura com o ativador alcalino, constituído pelo silicato de sódio (SS) com o hidróxido de sódio (SH), numa proporção SS/SH=0,5. O hidróxido de sódio foi fornecido numa solução de 32% que foi convertido em 5 molal por adição de água. O silicato de sódio foi fornecido numa solução com 14,64 kN/m³ a 20°C, uma razão de SiO₂/Na₂O de 2,0 e uma concentração de Na₂O em solução de 13,0%. No Quadro 4 apresentam-se os valores característicos da mistura efetuada. Após a execução, a camada foi deixada ao abrigo da chuva, em cura durante 28 dias. Em seguida, foi feita a molhagem abundante da camada.

Quadro 4. Características de aplicação da mistura de solo tratado

% Cinza	Conc. NaOH (molal)	SS/SH (*)	Teor em líquido (%)	Teor em água (%)	γ_d (kN/m ³)
20	5	0,5	19,2	14,7 %	17

(*) SS/SH = rácio entre silicato de sódio e hidróxido de sódio em massa

Durante a construção do macro-provete, após a regularização e compactação de cada uma das camadas, foram realizados ensaios de caracterização pelo Laboratório Central da MOTA-ENGIL, em todas as seis situações previstas, nomeadamente nas três camadas não tratadas e em três condições distintas da camada tratada: imediatamente após compactação; após 28 dias de cura; e aos 29 dias de cura após molhagem. É de notar que no caso do ensaio DIP não foi possível realizar este ensaio na 1ª e 3ª camadas construídas com solo natural. Por outro lado, no caso da camada tratada foram realizados ensaios regulares a partir do 14º dia de cura.

Em cada situação, foram realizados oito ensaios com gamadensímetro (designados S TR, na planta da Figura 2), quatro ensaios com defletómetro de impacto portátil (designados S DIP) e um ensaio de carga com placa (designado S PLT), que seguiram, respetivamente, as normas ASTM D 6938 [5], ASTM E 2583 [6] e NF P 94-117-1 [7]. Estes ensaios localizaram-se sempre na mesma posição em planta (Figura 2), à exceção dos ajustamentos nos ensaios de carga em placa e nos ensaios com gamadensímetro realizados na camada tratada, para evitar as influências de zonas previamente ensaiadas. Estas variações encontram-se igualmente indicadas na planta da Figura 2. No ensaio DIP isso não foi considerado relevante, dada a natureza do carregamento. Estes ensaios foram realizados com uma placa de 0,30 m de diâmetro e uma altura de queda de 0,80 m, efetuando medições num geofone central (E1). Foram ainda realizados pelo LNEC ensaios com DIP aos 28 dias de cura e um dia depois, após a molhagem abundante da camada tratada. Finalmente, os ensaios de carga em placa foram realizados apenas na 3ª camada e na camada tratada, no dia da sua execução, aos 28 dias e 20 horas após a molhagem abundante. Na Figura 3 apresentam-se imagens ilustrativas da experiência.

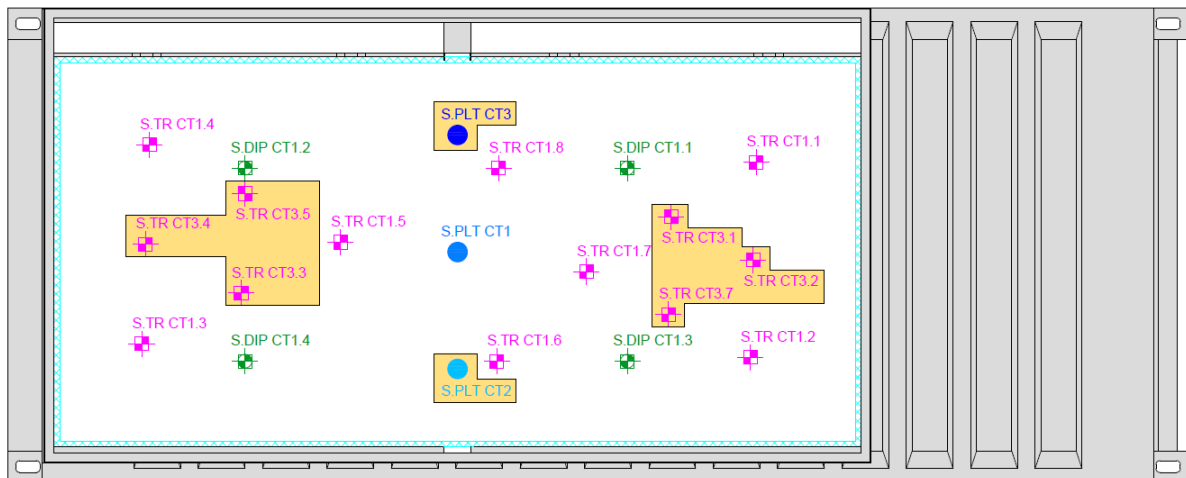


Fig.3. Pormenores da execução da experiência

3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Em seguida apresentam-se os resultados obtidos de acordo com a metodologia discutida no capítulo anterior. Na Figura 4 apresentam-se os perfis relativos aos parâmetros físicos e à compactação relativa obtidos ao longo da profundidade do bloco experimental. Esta representação implica, de algum modo, o agrupamento coerente da informação obtida em cada camada, pelo que, apesar da reduzida quantidade de registos, se decidiu utilizar para esse fim os parâmetros estatísticos máximo, mínimo, média e mediana. Esta representação permite observar as tendências de variação tanto em planta como em profundidade, sendo útil para uma análise global dos resultados.

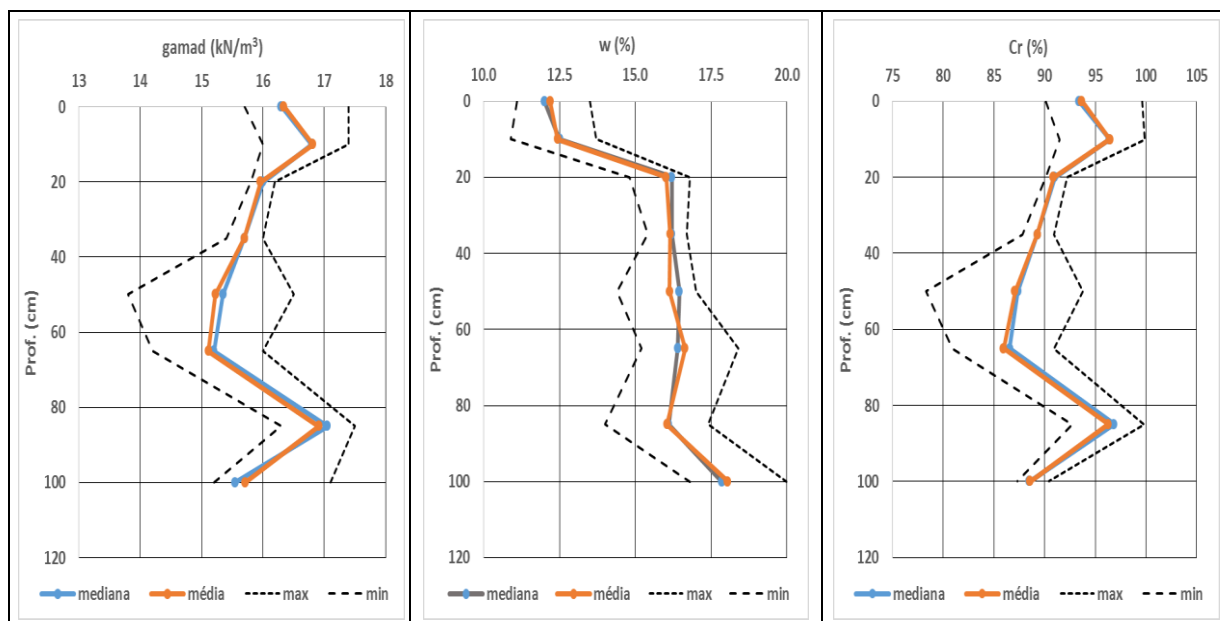


Fig.4. Resultados dos ensaios de controlo de compactação realizados a várias profundidades: a) peso volúmico; b) teor em água; c) compactação relativa

Da análise dos resultados é possível concluir que existe alguma variação em profundidade, em particular no que se refere ao grau de compactação das três camadas de material não tratado, havendo uma redução relativa na camada intermédia e na zona mais profunda da camada inferior. Estas variações podem estar associadas quer às condições de fronteira (influência da base rígida da câmara) quer à espessura com que as camadas foram compactadas, a qual não foi constante, de acordo com o que foi já referido.

A terceira camada é a que apresenta resultados mais homogêneos. Note-se que, se for considerado que os valores obtidos nos ensaios com o gamadensímetro em profundidade são mais representativos da situação (menos afetados pelo baixo confinamento e para onde tenderão os valores de superfície após a compactação da camada suprajacente), verifica-se que a maior variação entre camadas é de 2% para o teor em água de compactação, inferior a 0,5 kN/m³ nos casos dos pesos volúnicos seco e saturado e inferior a 5% em termos de compactação relativa, o que se pode considerar relativamente bom sob o ponto de vista de homogeneidade.

Por seu lado, a variabilidade em planta pode, de algum modo, ser entendida através da análise da diferença entre o máximo e o mínimo e o posicionamento da média e da mediana das distribuições. Verifica-se que, à exceção dos valores obtidos na superfície da segunda camada, onde a variação é mais significativa, as diferenças variam entre 2,5 e 5% para o teor em água, entre 0,5 e 1,5 kN/m³ para os pesos volúnicos seco e húmido e entre 2,5 e 10% para a compactação relativa. No caso da terceira camada, que constitui a fundação da camada tratada e foi considerada a camada de referência para o solo não tratado, as variações cifram-se em valores geralmente inferiores a 2% no teor em água, inferiores a 1% em ambos os pesos volúnicos, húmido e seco, e 5% na compactação relativa.

No que se refere à camada tratada, esta foi construída com materiais que exibiam teor em água inferior aos do material natural, tendo sido obtidos valores do peso volumico e do grau de compactação semelhantes aos valores mais elevados que foram medidos na camada mais profunda, construída com solos naturais.

Na Figura 5a apresentam-se os valores do módulo de deformabilidade obtidos nas seguintes condições: i) com o DIP da MOTA-ENGIL em quatro locais da camada não tratada após a sua construção; ii) com o mesmo equipamento na camada tratada durante a cura, nomeadamente aos 14, 21, 28 e 29 dias; iii) com o DIP do LNEC aos 28 e 29 dias. Todos os ensaios realizados aos 29 dias foram efetuados após a molhagem do macro-provete, a partir da superfície.

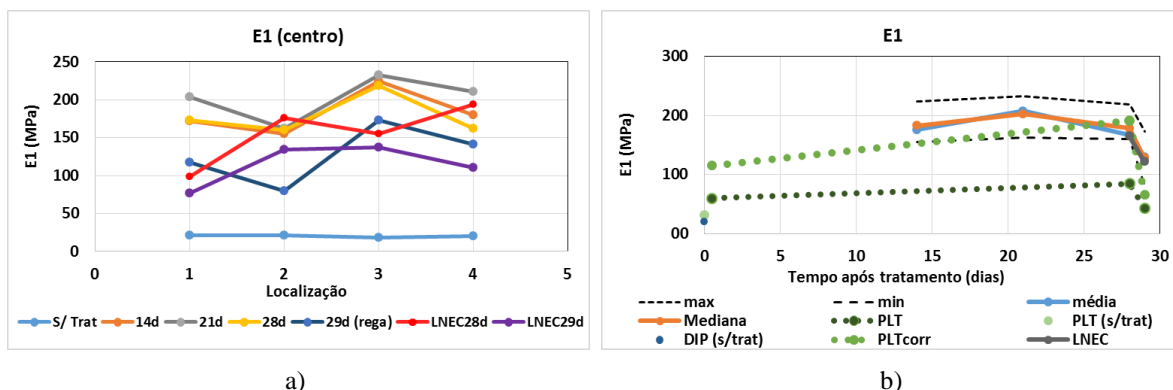


Fig.5. Valores do módulo de deformabilidade: a) ensaios DIP em diversos locais; b) ensaios DIP e PLT em várias datas

Esses diagramas revelam que os valores do módulo obtidos com o DIP na camada tratada, durante a cura, em qualquer das datas, foram significativamente mais elevados do que os obtidos na camada não tratada. De um modo geral, verifica-se que os resultados obtidos aos 28 dias de cura se enquadram num intervalo que varia entre 150 e 200 MPa; as exceções são os valores obtidos na localização 1 com o defletómetro do LNEC (claramente inferior a todos) e na localização 3 com o defletómetro da MOTA-ENGIL (um pouco acima desse intervalo).

Na Figura 5b apresenta-se a evolução no tempo dos valores do módulo obtidos com os defletómetros e com os ensaios de carga em placa. Numa primeira análise, os resultados obtidos pelos dois métodos apontam para ganhos de rigidez associados à construção da camada tratada relativamente distintos: por um lado, um ganho significativo de acordo com os ensaios DIP (passando de cerca de 20 MPa para valores, em geral, entre 150 e 200 MPa); por outro, um ganho mais modesto quando se consideram os resultados do ensaio de carga com placa (passando de cerca de 30 MPa para valores da ordem de 60 a 90 MPa). Esta diferença pode ser devida aos seguintes dois fatores: i) diferentes condições de solicitação associadas aos dois ensaios (solicitação dinâmica com o DIP e solicitação quase-estática com o PLT) que provocam distintos níveis de extensão nos materiais, o que pode ser relevante para a sua resposta, tendo em conta o comportamento não linear dos geomateriais; ii) pelo facto de o módulo determinado, tratando-se de um módulo equivalente obtido à superfície, não se referir apenas à camada tratada, mas também a uma espessura de cerca de 0,40 m do volume de solo não tratado, dado que o bolbo de pressões do ensaio PLT atinge cerca de 0,60 m de profundidade. Considerando a espessura da camada tratada, o valor do módulo equivalente obtido sobre a mesma e o valor do módulo equivalente obtido no ensaio de carga realizado no topo das camadas não tratadas, é possível deduzir o módulo de deformabilidade do material da camada tratada; neste caso obtiveram-se os valores representados na Figura 5b com a designação de PLT_{corr} , os quais variam entre cerca de 100 e 200 MPa, e que traduzem uma razoável aproximação aos resultados obtidos pelo método dinâmico (DIP).

No que se refere à comparação dos resultados obtidos antes e após a molhagem (aos 29 dias), verifica-se um decréscimo algo significativo dos valores do módulo medidos com ambos os defletómetros de impacto, tendo-se obtido resultados entre 80 e 150 MPa. Essa tendência é igualmente verificada nos ensaios de carga em placa, quando se comparam os resultados obtidos antes e após molhagem. Em geral, a relação entre a rigidez medida no topo do macro-provete depois da molhagem enquadra-se entre 50 e 90% do valor antes da molhagem, de acordo com os resultados obtidos nos ensaios DIP, e fixa-se em cerca de 50% quando se consideram os valores obtidos com o ensaio de carga em placa.

4 CONCLUSÕES

A realização da experiência relatada na presente comunicação permite estabelecer um conjunto de considerações importantes tanto no contexto da utilidade da câmara de calibração como nas características de aplicação da solução de tratamento de solos analisada.

A grande vantagem de trabalhar com uma câmara de calibração como aquela utilizada nesta experiência, é ser possível ensaiar um volume considerável de terreno, com escala para ser representativo das condições *in situ*, e ao mesmo tempo permitir um controlo de condições de execução próximo daquele conseguido aquando da elaboração de provetes de dimensões reduzidas para ensaio em laboratório. Neste caso, foi possível controlar a execução do macro-provete e avaliar requisitos de desempenho recorrendo a ensaios *in situ* que são correntes no controlo de execução de aterros de obras viárias.

Ao nível da execução do tratamento de solos analisado, um dos fatores mais importantes prende-se com o estabelecimento de regras para o manuseamento dos produtos químicos, obrigando à utilização, por parte dos trabalhadores, de equipamento especial de proteção de pele e respiratório que naturalmente poderá traduzir-se na redução de ritmos de trabalho. Para além disso, nas situações em que as obras são realizadas em zonas urbanas, é necessário tomar medidas no sentido de proteger as populações que se encontram nas zonas adjacentes aos locais de trabalho.

Da mesma forma do que é habitual nos tratamentos tradicionais de solos em que se utiliza cal e/ou cimento, o tratamento analisado neste trabalho requer o estabelecimento de uma formulação adequada e a criação de condições para que se obtenha em obra uma massa homogénea constituída por solo, cinzas e ativador. Em termos de duração e de complexidade no espalhamento e compactação da mistura, este tipo de tratamento deverá ser semelhante aos tratamentos tradicionais. Todavia, será útil proceder à execução de aterros experimentais com o material tratado, para aferição das melhores condições de compactação, nomeadamente o número de passagens de compactador e o tipo de compactação a introduzir (estática ou dinâmica), sobretudo porque a experiência no assunto é ainda incipiente. Neste caso, a compactação foi apenas de tipo dinâmico, procurando manter-se os mesmos tempos de compactação em todas as camadas.

Sob o ponto de vista da eficiência da solução de tratamento de solos analisada, a evolução da rigidez – avaliada através dos valores do módulo de deformabilidade medidos em ensaios de carga dinâmicos (DIP) e quase-estáticos (PLT), revela um aumento significativo desse parâmetro, quando medido sobre a camada tratada, em relação ao valor obtido sobre o solo natural. Para além disso, o valor obtido sobre a camada tratada aumenta ao longo do tempo de cura.

Por outro lado, foi possível constatar que o valor do módulo de deformabilidade medido sobre a camada tratada evidenciou uma quebra acentuada da rigidez após a molhagem do macro-provete. Essa quebra é assinalada em ambos os ensaios, sendo cerca de 50 a 90% do valor do módulo equivalente medido antes da molhagem, a qual foi realizada aos 28 dias. De facto, podendo haver infiltração de água através da camada superior de solo tratado, proporcionando a alteração do estado hídrico do solo natural das camadas subjacentes, o módulo de deformabilidade equivalente medido à superfície pode diminuir por diminuição do valor módulo do solo natural, devido ao aumento do seu teor em água. Os resultados dos estudos laboratoriais realizados sobre provetes de solo tratado, curados na câmara fitoclimática, poderão ajudar na interpretação da informação agora obtida.

5 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado no âmbito do projeto ECOSOLO (FCOMP-01-0202-FEDER-038899), financiado pelo Fundo Europeu para o Desenvolvimento Regional (FEDER), através do programa operacional para Factores de Competitividade (POFC) do Quadro de Referência Estratégico Nacional (QREN), no contexto do sistema de incentivos para investigação e desenvolvimento tecnológico. Os autores querem ainda agradecer à companhia Pegop – Energia Eléctrica SA, que explora a Central Termoelétrica do Pego, pelo fornecimento e transporte das cinzas utilizadas na experiência e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia do ministério da Ciência e Tecnologia da República Portuguesa, pelo seu apoio financeiro através da bolsa SFRH/BPD/85863/2012, co-financiada pelo Fundo Social Europeu (POCH).

6 REFERÊNCIAS

1. Rios, S., Cristelo, C., Viana da Fonseca, A., Ferreira, C. (2015). Structural Performance of Alkali Activated Soil-Ash versus Soil-Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering* DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001398.
2. van Jaarsveld, J. G. S., J. S. J. van Deventer and G. C. Luckey (2003). The characterisation of source materials in fly ash-based geopolymers. *Materials Letters* 57: 1272-1280.
3. Wallah, S.E. and Rangan, B.V. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: long-term properties. *Research report GC2*. Faculty of Engineering, Curtin University of Technology, Perth, Australia.
4. ASTM C 618 (2015). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. Vol. 04.02. United States
5. ASTM D6938 (2015). *Standard Test Method for In-Place Density and Water Content of Soil and Soil-Aggregate by Nuclear Methods (Shallow Depths)*. Vol. 04.09. United States
6. ASTM E 2583 (2011). *Standard Test Method for Measuring Deflections with a Light Weight Deflectometer (LWD)*. Vol. 04.03. United States
7. AFNOR NF P 94-117-1 (2000). Part 1, *Plate test static deformation module (EV2)*. Association Française de Normalisation, Paris La Défense